

7 1 6 2 2 5 - 1

На правах рукописи

ИВАНОВ Алексей Викторович

**АВТОНОМНАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА
С ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ**

Специальность 05.09.03 - электромеханические комплексы и системы,
включая их управление и регулирование

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2000

Работа выполнена на кафедре Электротехники и электропривода
Казанского Ордена Трудового Красного Знамени государственного
технологического университета

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РТ,
доктор технических наук,
профессор Л.Я.Зиннер
Научный консультант: кандидат технических наук
доцент Г.Ф.Кропачев

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



0000947925

: оппоненты: доктор технических наук,
профессор Р.Г.Идиятуллин
кандидат технических наук
профессор А.И.Карань

Ведущая организация: АО "НИИ Турбокомпрессор", г.Казань

Защита диссертации состоится "26" мая 2000г. в "14" часов
на заседании диссертационного Совета К063.43.06 при Казанском госу-
дарственном техническом университете им. А.Н.Туполева по адресу:
г.Казань, ул. Толстого, 15, 3-учебное здание КГТУ, ауд.317.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ
им.А.Н.Туполева.

Ваши отзывы, заверенные печатью, в двух экземплярах просим вы-
слать по адресу: 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, 10.

Автореферат разослан "24" апреля 2000г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета, д.т.н.,
профессор

 А.Ю.Афанасьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для современных условий развития общества характерно ужесточение требований к использованию энергоресурсов с целью их сбережения и снижения ущерба окружающей среде. В связи с чем возрастает актуальность разработки, внедрения и совершенствования установок на основе нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ), в частности энергии ветра.

Обозначая область использования автономных ветроэнергетических установок (ВЭУ), следует выделить ВЭУ для целей теплоснабжения автономных объектов (дач, коттеджей, ферм и т.п.), где они имеют в основном малый срок окупаемости. Потребительские свойства энергоустановок индивидуального пользования характеризуют такие их качества, как приемлемая цена, продолжительный срок службы, надежность, максимальная простота эксплуатации. Для автономных ВЭУ такие требования могут быть достигнуты путем выбора нерегулируемого ветродвигателя (ВД) без мультипликатора, индукторного генератора и нагрузки, некритичной к параметрам источника ее питания. В качестве такой нагрузки перспективным является использование устройств индукционного нагревателя (УИН), благодаря характерной для них зависимости активной мощности от частоты тока. Данное свойство позволяет без существенного усложнения электрической схемы ВЭУ с УИН обеспечить стабилизацию действующего значения тока. Это обеспечивает постоянство электрических потерь в якорной цепи генератора, соединительных проводах и катушках индуктора УИН. Помимо этого появляется возможность относительно простыми способами организовать заряд аккумуляторных батарей (АБ) или буферный режим их работы.

Теоретические и практические аспекты исследования режимов совместной работы ВЭУ с УИН в настоящее время недостаточно раскрыты и являются актуальными. Одной из основных задач является техническая разработка электрической схемы и конструкции рассматриваемого ветроагрегата с рациональными свойствами и характеристиками.

Следует отметить, что в предлагаемой ВЭУ отсутствие ряда стабилизирующих связей в ее электрической и механической частях приводит к необходимости исследования влияния порывов ветра на ее энергетические характеристики. При этом определенными преимуществами обладают аналитические методы.

Цель настоящей работы заключается в создании автономной ВЭУ

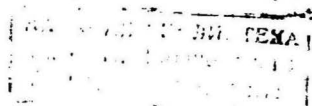
с нагрузкой типа УИН, имеющей рациональные технические и энергетические характеристики.

Задача научного исследования: разработка математической модели ВЭУ с УИН и ее реализация с целью проектирования агрегата, учитывающего особенности конструкции, функционирования и режимов работы.

В соответствии с поставленной задачей в работе исследуются следующие вопросы:

- разработка конструкции ВЭУ с УИН включающая в себя рациональный выбор типов ВД, электрических генераторов (ЭГ) и УИН;
- согласование режимов работы ВД, ЭГ и УИН для определения рабочего диапазона частоты вращения вала ВД, частоты тока якоря ЭГ и основных параметров УИН;
- на основе электрической схемы замещения анализ совместной работы ВЭУ с УИН при постоянной скорости ветра;
- настройка электрической части системы ВЭУ с УИН в резонанс напряжений для стабилизации действующего значения тока и повышения $\cos \varphi$;
- получение аналитических выражений ЭДС, тока якоря и электромагнитного момента синхронного генератора при периодических изменениях угловой частоты вращения ротора относительно ее среднего значения;
- исследование зависимости коэффициента пульсаций частоты вращения вала генератора от средней скорости ветра;
- разработка методики расчета энергетических характеристик системы ВЭУ с УИН с учетом порывов ветра и их анализ;
- сравнение результатов предлагаемой методики расчета УИН с данными эксперимента.

Основные методы исследования. В основу теоретических исследований системы ВЭУ с УИН положены методы гармонического баланса и Бубнова-Галеркина, а также принцип наложения. Расчет энергетических характеристик основывается на итерационном методе и выполнен на ПЭВМ с использованием программы, написанной в системе Turbo Pascal. Для оценки точности результатов моделирования УИН в условиях совместной работы с ВЭУ проведены экспериментальные исследования макетных образцов в лабораторных условиях, где в качестве ветродвигателя выступал регулируемый электропривод постоянного тока ЭПУ-1-2-3727ПУХЛ4, а в качестве генератора - электрическая маши-



на с постоянными магнитами на роторе от установки ДВУ215МТ.

Научная новизна работы:

– разработана математическая модель ВЭУ с УИН, максимально адекватная физике протекания электромеханического преобразования энергии в ней;

– получены аналитические выражения ЭДС, тока якоря и электромагнитного момента синхронного генератора в виде гармонических рядов, позволяющие учесть периодические колебания угловой частоты вращения ротора относительно ее среднего значения;

– определены зависимости коэффициента пульсаций частоты вращения вала ВД от средней скорости ветра при различных моментах инерции вращающихся частей агрегата;

– исследованы основные энергетические характеристики системы ВЭУ с УИН при постоянной скорости ветра и с учетом его порывов;

Практическая ценность:

– создана методика расчета системы ВЭУ с УИН, позволяющая учесть влияние порывов ветра на ее энергетические характеристики;

– изготовлены и исследованы экспериментальные образцы УИН для работы их совместно с автономной ВЭУ;

– проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных УИН, соответствующих постоянной частоте вращения вала питающего его генератора.

Использование результатов работы:

Основные научные и практические результаты, разработанные расчетные методики, рекомендации и устройства внедрены в учебном процессе Казанского государственного технологического университета, во Всероссийском научно-исследовательском институте расходомерии и в Исследовательском центре “Омега”, г.Казань.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на республиканской научно-технической конференции “Проблемы энергетики” в КФ МЭИ - ТУ г.Казань, 1997г., на III республиканской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов г.Казань, 1997г., на XV научно-технической конференции “Вопросы совершенствования боевого применения и разработок артиллерийского вооружения и военной техники” в КВАКИУ г.Казань, 1997г., на республиканской научной конференции “Проблемы энергетики” в КФ МЭИ - ТУ г.Казань, 1998г., на XVI военно-технической конференции “Вопросы совершенствования боевого применения и разрабо-

ток артиллерийского вооружения и военной техники" в КФ ВАУ г.Казань, 1999г., на научной сессии КГТУ г.Казань, 2000г.

Публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, содержит 104 страниц машинописного текста, 17 рисунков, 2 таблицы, 82 наименования использованных литературных источников, 4 страницы приложений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Во введении содержится общая характеристика работы, показана актуальность темы, сформулированы цель и задача исследования, а также научная новизна и практическая ценность результатов.

В первой главе дан анализ современного состояния и этапы развития ветроэнергетики, обоснованы эффективные режимы работы автономных ВЭУ, проведен сравнительный анализ ее основных узлов и устройств электронагрева, определена задача научного исследования.

Роль НВИЭ в современном электроснабжении будет неуклонно возрастать, чему способствуют экологические и, главным образом, экономические факторы. Практические неограниченные запасы НВИЭ, в частности энергии ветра, требует необходимость в проведении исследований в этой области.

Исследования, проведенные отечественными и зарубежными авторами, а также анализ ныне действующих ветроустановок и современных теоретических разработок позволяет сделать вывод, что для автономных ВЭУ расчетной мощностью в пределах 10кВт перспективным является использование быстроходных ВД, работающих с переменной частотой вращения вала, без мультипликатора, и многополюсных электрических генераторов (ЭГ) (аксиального индукторного двухпакетного с внутренним расположением обмотки возбуждения и синхронного генератора с постоянными магнитами обращенной конструкции).

Анализируя заинтересованность автономных потребителей в энергии, отмечается, что для их большинства основная потребность имеется в тепловой энергии. Для этих целей эффективность использования ВЭУ по сравнению с альтернативными источниками энергии повышается. На основе сравнительного анализа всевозможных типов электронагрева применительно к совместной работе с ВЭУ предпочтение отдается ин-

дукционному, в виду характерной для него зависимости активной мощности от частоты тока. Данное обстоятельство выгодно сочетается с эффективным режимом работы ветроагрегата. Кроме того, установки индукционного нагрева отличаются продолжительным сроком эксплуатации. Отрицательным фактором применения УИН является относительно низкий $\cos \varphi$. Используя, в качестве аналога, конструкции УИН для химических аппаратов и анализируя достижения в этой области, делается вывод о рациональности применения магнитозамкнутой цилиндрической системы индуктор-загрузка. Для интенсификации процесса нагрева форма греющего элемента может быть целенаправленно изменена.

Актуальными являются вопросы теоретического и практического исследования режимов совместной работы ВЭУ и УИН.

Также отмечается, что математическая модель системы ВЭУ с УИН с учетом порывов ветра, базирующаяся на использовании численных методов, чрезмерно усложняется. Это приводит к необходимости определения других подходов решения данной задачи.

На основании проведенного анализа определена область настоящего исследования, а именно разработка математической модели ВЭУ с УИН и ее реализация с целью проектирования агрегата, учитывающего особенности конструкции, функционирования и режимов работы.

Во второй главе представлена математическая модель, описывающая скорость ветра и основные узлы автономной ВЭУ с УИН.

Скорость ветра, сопровождающегося порывами, рассматривается как синусоидальные во времени колебания относительно сравнительно медленно меняющегося среднего значения (V_0)

$$V = V_0 [1 + k_n \cos(\omega_v t + \beta_v)], \quad (1)$$

где коэффициент k_n и круговая частота ω_v пульсаций скорости ветра определяются по известным стохастическим зависимостям

$$k_n = 0,2 + 7,2/V_0, \quad \omega_v = \pi \cdot 0,0038 V_0^{2,28}.$$

Зависимости (1) соответствует установившийся режим работы ВЭУ, сопровождающийся периодическими изменениями во времени частоты (Ω) вращения вала ВД.

Математическое описание ВД производится на основе аэродинамических характеристик: зависимости относительного момента вращения ветроколеса \bar{m} и коэффициента использования энергии ветра ξ от числа модулей $z = R_g \Omega / V$. Зависимости $\bar{m} = \bar{m}(z)$ для рабочего диапа-

зона ВД считается линейной. Момент вращения M_θ и развиваемая ВД мощность N_θ определяются по известным формулам

$$M_\theta = \frac{1}{2} \pi \rho_\theta R_\theta^3 V^2 \overline{m}, \quad N_\theta = \frac{1}{2} \pi \rho_\theta R_\theta^2 V^3 \xi. \quad (2)$$

Здесь R_θ – радиус ВД, ρ_θ – массовая плотность воздуха.

Согласно проведенным исследованиям по совместной работе ВД и ЭГ, рекомендуется принять следующий эффективный режим работы:

- при скоростях ветра меньше расчетной ($V < V_p$) обеспечивает работу ВД с постоянным числом модулей, равным номинальному;
- при $V \geq V_p$ ВД работает с постоянным моментом, равным расчетному моменту ЭГ.

В качестве исследуемой конструкции ЭГ принимается синхронный генератор с магнитоэлектрическим возбуждением, без демпферной обмотки, с равными значениями полных продольного и поперечного индуктивных сопротивлений. Для описания процессов, проходящих в ЭГ, используются известные дифференциальные уравнения на основе теории цепей и уравнение электромеханической связи с общепринятыми в теории моделирования электрических машин допущениями. Для случая постоянной частоты вращения уравнение напряжения фазы генератора записывается в комплексной форме

$$\dot{U}_a = \dot{E}_f - jX_a \dot{I}_a - R_a \dot{I}_a,$$

где \dot{I}_a , \dot{E}_f – комплексные значения тока якоря и ЭДС возбуждения, индуктированная полем взаимной индукции от МДС возбуждения; X_a – полное индуктивное сопротивление якоря; R_a – активное сопротивление проводников обмотки якоря.

Электромагнитные величины мощности и момента ЭГ при пренебрежении потерями в стали определяются по соответствующим формулам

$$P_f = m_1 (R_a + R_H) I_a^2, \quad M_f = P_f / \Omega.$$

Здесь R_H – активное сопротивление нагрузки, m_1 – число фаз ЭГ.

УИН рассматривается как система с распределенными параметрами. В основу исследований принята модель участка бесконечно длинной цилиндрической системы индуктор-загрузка, описываемого уравнениями Максвелла. Для синусоидальных величин напряженностей магнитного и электрического поля используется модель УИН в виде электри-

ческой схемы замещения с нелинейными параметрами. Напряжение на зажимах индуктора

$$\dot{U}_u = (R_1 + R'_2)\dot{I}_u + j(X_S + X'_2)\dot{I}_u$$

При этом, \dot{I}_u – комплексное значение тока в обмотке индуктора; R'_2 и X'_2 – нелинейные приведенные к обмотке индуктора активное и индуктивное сопротивления загрузки, соответственно; R_1 – активное сопротивление обмотки индуктора; X_S – реактивное сопротивление зазора и индуктора.

В третьей главе исследуется работа автономной ВЭУ с УИН при постоянной скорости ветра.

Основываясь на данных типовой для быстроходных ветроколес аэродинамической характеристики профиля “Эсперо”, был определен рабочий диапазон частоты вращения вала ВД, соответствующий описанному выше эффективному режиму его работы. При этом принималось значение расчетной скорости ветра $V_p = 10 \text{ м/с}$ и ее изменение в диапазоне $3 \leq V \leq 30 \text{ м/с}$. Полученные данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

N_p , кВт	2	4	6	8	10
R_θ , м	1,52	2,15	2,63	3,04	3,40
Ω_p , рад/с (n_p , об/мин)	46,05 (439,8)	32,57 (311,0)	26,40 (254,0)	23,03 (219,9)	20,06 (196,7)
Ω_{\max}/Ω_p	5,47				
Ω_p/Ω_{\min}	3,33				
$\Omega_{\max}/\Omega_{\min}$	18,22				

В таблице приняты обозначения: Ω_p , Ω_{\max} , и Ω_{\min} – расчетная, максимальная и минимальная частоты вращения вала ВД соответствующие скоростям ветра 10, 30 и 3 м/с, соответственно. Их анализ показывает, что расчетные частоты вращения вала ВД имеют относительно низкие значения. Однако, обеспечение высоких показателей поверхностной мощности УИН, обуславливающий несогласованные показатели нагревателя, достигается повышением частоты тока. Поэтому, для ВЭУ с нагрузкой типа УИН необходимо использовать ЭГ с максимально возможными числами пар полюсов, т.е. индукторные генераторы (ИГ).

На основании формулы машинной постоянной исследуется значение максимально допустимой частоты тока аксиальных двухпакетных ИГ, соответствующее его рациональным энергетическим характеристикам. В результате для частот вращения и мощностей, соответствующих данным таблицы 1, получено значение расчетной частоты тока ИГ $f_p = 200$ Гц.

Параметры УИН оценивались на основании выражения удельной поверхностной мощности, представленного в виде

$$p_0 = 7,436 \cdot 10^{12} \mu_{el}^{-2,238} \rho \left(\sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_{el}}{2\rho}} - \frac{1}{D_e} \right),$$

где μ_{el} — относительная магнитная проницаемость, определяемая из усредненной кривой намагничивания углеродистых сталей по действующему значению первой гармоники напряженности магнитного поля; ρ — удельное электрическое сопротивление нагреваемого тела; D_e — его внешний диаметр.

В частном случае $D_e = 0,03 \div 0,30$ м, $\rho = (2 \div 3) 10^{-7}$ Ом·м, $f = f_{\max} = 1094$ Гц, $p_0 = 40$ кВт/м² имеем значение относительной магнитной проницаемости $\mu_{el} = 150$. Толщина стенки загрузки (ферромагнитной трубы), определенная по расчетному значению частоты $f_p = 200$ Гц, должна быть $d > (2,8 \div 3,4) \cdot 10^{-3}$ м. Значения d соответствуют ассортименту стальных труб, выпускаемых промышленностью, что позволяет унифицировать узлы нагревателя.

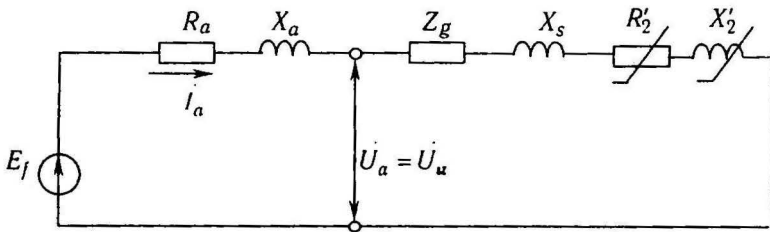


Рис.1. Электрическая схема замещения системы ЭГ-УИН.

Основываясь на полученных данных предварительного проектирования был проведен анализ энергетических характеристик системы ЭГ-УИН, представленной в виде электрической схемы замещения на рис.1. В виду нелинейности параметров R'_2 и X'_2 расчет производился

итерационным методом. Характеристики системы приведены на рис.2. из которого видно, что система ЭГ-УИН имеет невысокие показатели $\cos \varphi$.

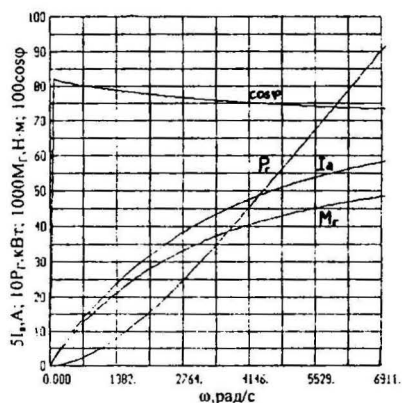


Рис.2. Энергетические характеристики системы ВЭУ с УИН с параметрами $E_f/f = 0.96$; $R_a = 0.7$; $X_a = 1 \cdot 10^{-3} \omega$; $R_g = 2.7$; $X_s = 0.8 \cdot 10^{-3} \omega$; $D_e = 0.045$; $\omega_u = 1075$; $l_3 = 1.85$.

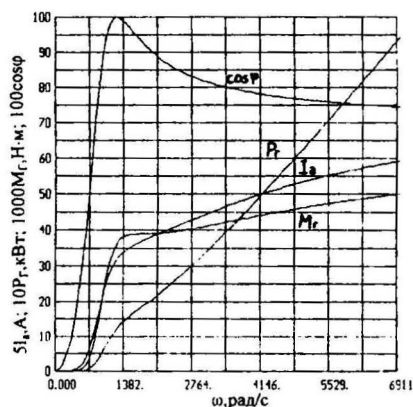


Рис.3. Настройка системы ЭГ-УИН на резонанс напряжений

Кроме того, показано, что настройка электрической части системы ВЭУ с УИН на резонанс напряжений позволяет без существенного усложнения схемы обеспечить режим работы ВЭУ близкий к эффективному, а также в области рабочих скоростей ветра повысить $\cos \varphi$. Характеристики иллюстрирующие названный режим показаны на рис.3.

Анализируя работу ВЭУ при $V > V_p$ в режиме постоянного момента делается вывод об эффективности осуществления стабилизации тока во внешней цепи генератора. В этом случае появляется возможность относительно простыми способами организовать заряд (или буферный режим работы) аккумуляторной батареи. Электрическая принципиальная схема такой установки представлена на рис.4.

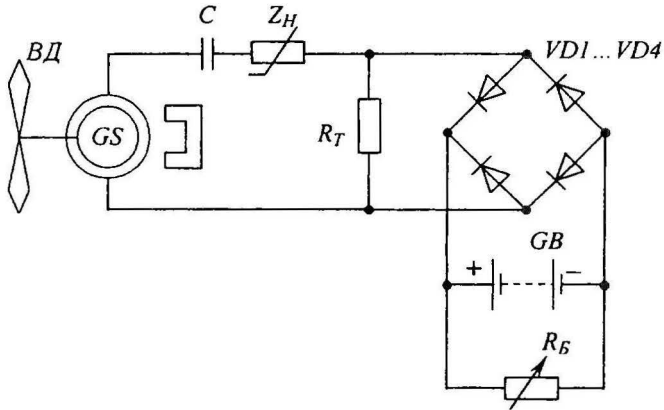
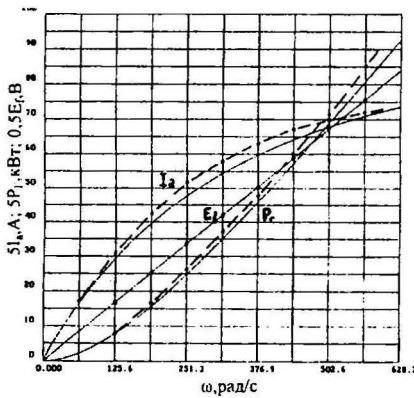
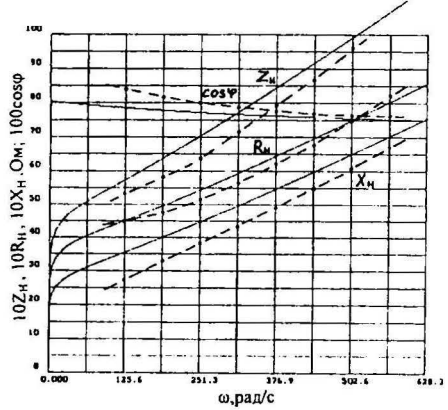


Рис.4. Z_H — полное сопротивление нагрузки; R_T — активное сопротивление (ТЭН); R_B — активное сопротивление балластной нагрузки.



а)



б)

Рис.5. — расчет, ----- эксперимент

Полученные в главах 2 и 3 формулы и рекомендации сведены в методику расчета УИН, работающих совместно с ВЭУ. Проведенные в лабораторных условиях экспериментальные исследования образцов УИН подтверждают применимость данной методики для выполнения

инженерных расчетов. Сравнение экспериментальных и расчетных данных представлено на рис.5.

В четвертой главе проводится исследование влияния порывов ветра на энергетические характеристики автономной ВЭУ с УИН.

Порывы скорости ветра, описываемого выражением (1), приводят к периодическим колебаниям угловой частоты (Ω) вращения вала ВД, которые можно разложить в гармонический ряд Фурье. Ограничиваясь учетом первой гармоники, имеем

$$\Omega = \Omega_0 [1 + k_\Omega \cos(\omega_v t + \beta_\Omega)]. \quad (3)$$

Здесь $k_\Omega = \Delta\Omega/\Omega_0$ – коэффициент пульсаций частоты вращения вала ВД, равный отношению амплитудного значения пульсаций Ω к ее среднему значению, β_Ω – начальная фаза, которая для дальнейших вычислений принимается равной нулю.

Показывается, что такие колебаний (3) приводят к частотной модуляции потокоцепления и амплитудно-частотной модуляции ЭДС фазы обмотки якоря ЭГ:

$$\Psi = \Psi_m \cos(\omega_0 t + M_r \sin \omega_v t), \quad (4)$$

$$e = \Psi_m \omega_0 (1 + k_\Omega \cos \omega_v t) \sin(\omega_0 t + M_r \sin \omega_v t),$$

где Ψ_m – амплитудное значение потокоцепления; $\omega_0 = p\Omega_0$ – угловая частота; p – число пар полюсов; $M_r = k_\Omega \omega_0 / \omega_v$ – индекс модуляции.

Потокоцепление, представленное формулой (4), раскладывается в гармонический ряд

$$\Psi = \Psi_m \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(M_r) \cos(\omega_0 + n\omega_v)t, \quad (5)$$

При этом $J_n(M_r)$ – функция Бесселя первого рода.

На основании свойств функций Бесселя $J_n(M_r)$ становится пренебрежимо малым при увеличении $n > M_r$, ряд (5) может быть представлен в усеченном виде. Расчеты показывают, что в условиях работы ВЭУ приходится удерживать большое количество членов ряда ($N > 100$).

Представление потокоцепления в виде гармонического ряда позволяет использовать метод гармонического анализа рассматриваемой системы, основанный на принципе наложения, применение которого справедливо и для мощностей УИН. Следуя теории данного метода, получены формулы для мгновенных и действующих значений ЭДС и тока

якоря ЭГ и мгновенного и среднего значения его электромагнитного момента:

$$e_n = \Psi_m J_n(M_r)(\omega_0 + n\omega_v) \sin(\omega_0 + n\omega_v)t;$$

$$E_n = \frac{\Psi_m J_n(M_r)(\omega_0 + n\omega_v)}{\sqrt{2}}, \quad E = \sqrt{\sum_{n=-N}^N E_n^2};$$

$$i_n = \frac{\Psi_m J_n(M_r)(\omega_0 + n\omega_v)}{Z_n} \sin[(\omega_0 + n\omega_v)t - \varphi_n];$$

$$I_n = \frac{\Psi_m J_n(M_r)(\omega_0 + n\omega_v)}{\sqrt{2}Z_n}, \quad I = \sqrt{\sum_{n=-N}^N I_n^2};$$

$$M_{\Gamma,n} = \frac{p \Psi_m^2 J_n^2(M_r)(\omega_0 + n\omega_v)}{2Z_n} [\cos \varphi_n - \cos(2(\omega_0 + n\omega_v)t - \varphi_n)];$$

$$M_{\Gamma,cp} = \frac{p \Psi_m^2}{2} \sum_{n=-N}^N \frac{J_n^2(M_r)(\omega_0 + n\omega_v)}{Z_n} \cos \varphi_n, \quad M_{\Gamma} = \sum_{n=-N}^N M_{\Gamma,n}.$$

Для определения коэффициента пульсаций k_{Ω} частоты вращения вала ВД приведено решение уравнения движения агрегата

$$J_{\Sigma} \frac{d\Omega}{dt} = M_{\theta} - M_{\Gamma}$$

методом гармонического баланса. В уравнение движения входят: Ω — частота вращения вала ВД по формуле (3); M_{θ} — момент вращения ВД с учетом (1), (2), (3) в виде

$$M_{\theta} = M_{\theta,cp} + \Delta M_{\theta} \cos(\omega_v t + \beta_{\theta}),$$

где

$$\Delta M_{\theta} = \sqrt{\Delta M_{\theta 1}^2 + \Delta M_{\theta 2}^2 + 2\Delta M_{\theta 1}\Delta M_{\theta 2} \cos \beta_v},$$

$$\operatorname{tg} \beta_{\theta} = \frac{\Delta M_{\theta 1} \sin \beta_v}{\Delta M_{\theta 2} + \Delta M_{\theta 1} \cos \beta_v},$$

$$\Delta M_{\theta 1} = k_n k_{\theta} V_0^2 a_1 (2z_c - z_0), \quad \Delta M_{\theta 2} = -k_{\Omega} k_{\theta} V_0^2 a_1 z_0,$$

$$M_{\theta,cp} = k_{\theta} V_0^2 \bar{m}_0, \quad \bar{m} = a_0 - a_1 z_0, \quad z_0 = \frac{R_{\theta} \Omega_0}{V_0};$$

M_{Γ} — электромагнитный момент ЭГ в виде

$$M_{\Gamma} = M_{\Gamma,cp} + \Delta M_{\Gamma} \cos(\omega_v t + \beta_{\Gamma}),$$

здесь $\Delta M_r = \sqrt{\Delta M_{r1}^2 + \Delta M_{r2}^2}$, $\operatorname{tg} \beta_r = -\frac{\Delta M_{r2}}{\Delta M_{r1}}$. Коэффициенты ΔM_{r1} ,

ΔM_{r2} определяются методом Бубнова-Галеркина:

$$\Delta M_{r1} = -\frac{\rho \Psi_m^2}{\pi} \sum_{n=-N}^N \frac{J_n^2(M_r)(\gamma+n)^2}{Z_n(4\gamma^2-1)} [(\sin(4\pi\gamma - \varphi_n) + \sin \varphi_n)],$$

$$\Delta M_{r2} = -\frac{\rho \Psi_m^2}{2\pi} \sum_{n=-N}^N \frac{J_n^2(M_r)(\gamma+n)}{Z_n(4\gamma^2-1)} [\cos(4\pi\gamma - \varphi_n) - \cos \varphi_n],$$

где $\gamma = \omega_0 / \omega_v$.

В результате получено выражение для коэффициента пульсации k_Ω :

$$k_\Omega = \frac{\Delta M}{J_\Sigma \omega_v}. \quad (6)$$

При этом $\Delta M = \sqrt{\Delta M_\theta^2 + \Delta M_r^2 - 2\Delta M_\theta \Delta M_r \cos(\beta_r - \beta_\theta)}$, J_Σ — суммарный момент инерции вращающихся частей агрегата. Определение значений k_Ω по формуле (6) осуществляется на основе итерационного метода.

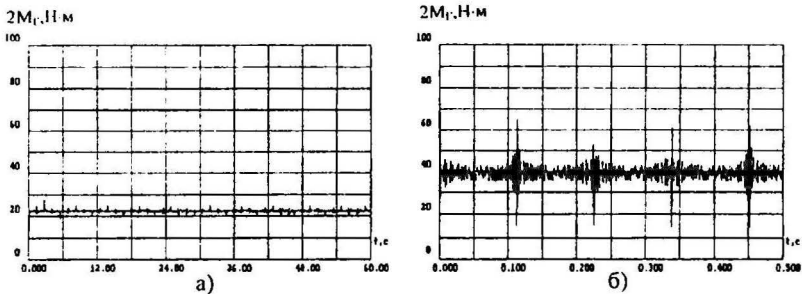


Рис.6. Мгновенные значения электромагнитного момента ЭГ при
а) $V=10$ м/с, б) $V=30$ м/с

Проведенные на ЭВМ расчеты, а также анализ мгновенных значений M_r , представленных на рис.6, позволяют сделать вывод, что с большой для практики точностью можно принять $M_r = M_{r, \text{ср}}$. Данное допущение приводит к значительному упрощению решения уравнения движения, в результате которого получены приближенные выражения для коэффициента пульсаций (k_Ω) частоты вращения вала ВД:

$$k_{\Omega} = \frac{k_n(2z_c - z_0)}{z_0} \cos \beta_v, \quad \beta_v = \arctg \left(\frac{J_{\Sigma} \Omega_0 \omega_v}{z_0(2z_c - z_0) k_n V_0^2 a_1} \right). \quad (7)$$

Выражения (7) устанавливают однозначную взаимосвязь между коэффициентом пульсаций частоты вращения вала ВД и значением средней скорости ветра.

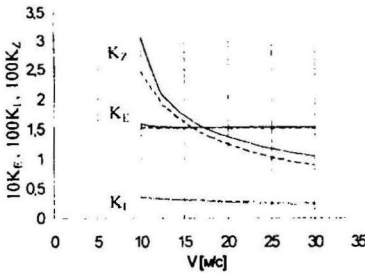


Рис.7а. $K_E = \frac{E_f}{\omega_0}$, $K_Z = \frac{Z_{\Sigma}}{\omega_0}$, $K_I = \frac{I_a}{\omega_0}$

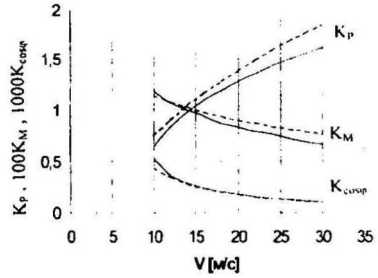


Рис.7б. $K_{\cos\varphi} = \frac{\cos\varphi}{\omega_0}$, $K_P = \frac{P_f}{\omega_0}$, $K_M = \frac{M_f}{\omega_0}$

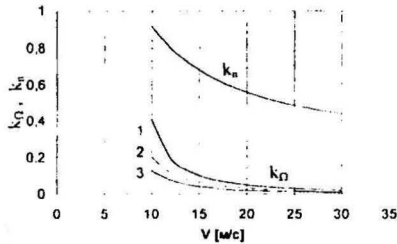


Рис.8. Зависимость k_{Ω} при различных значениях J_{Σ} :

1- $J_{\Sigma}=0.05$, 2- $J_{\Sigma}=0.08$, 3- $J_{\Sigma}=0.12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

С учетом полученных в данной главе формул был проведен сравнительный анализ характеристик системы ВЭУ с УИН при порывах скорости ветра. Результаты исследования приведены на рис.7 и 8, где сплошными линиями показаны кривые, соответствующие учету пульсаций скорости ветра, а штриховыми - их пренебрежению. Из рисунков видно, что порывы ветра приводят к увеличению действующего значения ЭДС якоря ЭГ, полного сопротивления (Z_{Σ}) и $\cos \varphi$ системы ЭГ-УИН, и к уменьшению действующего значения тока якоря, электромагнитного момента, активной мощности ЭГ. Увеличение момента инерции

вращающихся частей агрегата приводит к значительному уменьшению коэффициента пульсаций k_{Ω} частоты вращения вала ВД, причем изменение J_{Σ} в наибольшей степени влияет на k_{Ω} при малых скоростях ветра.

В заключении подводятся итоги результатов теоретических и экспериментальных исследований.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Создана и исследована новая структура ВЭУ для целей тепло-снабжения автономного объекта, состоящей из быстроходного нерегулируемого ВД и индукторного генератора с нагрузкой типа УИН, имеющая дополнительные возможности осуществления заряда или буферного режима работы АБ.

2. Проведенные исследования автономной ВЭУ мощностью $1 \div 10 \text{ кВт}$ позволили определить: диапазон изменения частоты вращения вала ВД, работающего в эффективном режиме, который составил $\Omega_{\text{max}} / \Omega_{\text{min}} = 18:1$; максимально допустимую частоту тока индукторного генератора, находящуюся в пределах $220 \div 450 \text{ Гц}$; толщину стенки ферромагнитной загрузки УИН, соответствующую ассортименту выпускаемых промышленностью стальных труб.

3. Анализ совместной работы ВЭУ с УИН показывает, что использование в качестве нагрузки индукционного нагревателя приводит к стабилизации действующего значения тока во внешней цепи ЭГ, которая еще больше усиливается при настройке электрической части системы в резонанс напряжений.

4. На основе полученных аналитических выражений ЭДС, тока якоря и электромагнитного момента синхронного генератора при периодических изменениях угловой частоты вращения ротора разработана методика расчета энергетических характеристик системы ВЭУ с УИН с учетом порывов ветра.

5. Проведен анализ влияния порывов ветра на энергетические характеристики ВЭУ с УИН, который показал, что порывы ветра приводят к увеличению действующего значения ЭДС якоря ЭГ, полного сопротивления, $\cos \varphi$ исследуемой системы, и к уменьшению действующего значения тока якоря, электромагнитного момента, активной мощности ЭГ.

6. Сравнение результатов предлагаемой методики исследования и проектирования УИН с данными эксперимента при постоянной частоте вращения вала питающего его генератора подтверждает их взаимное соответствие.

В приложениях содержатся акты внедрения научных и практических результатов диссертации.

По теме диссертации опубликованы следующие работы

1. Шилов А.В., Желонкин А.В., Иванов А.В., Кропачев Г.Ф. Ветроэнергетическая установка для целей теплоснабжения автономного объекта //Материалы докладов Республиканской научной конференции "Проблемы энергетики". Ч.2. Казань. КФМЭИ-ТУ. 1997. С.21.
2. Кропачев Г.Ф., Иванов А.В. К вопросу проектирования индукторного генератора //Материалы докладов Республиканской научной конференции "Проблемы энергетики". Ч.2. Казань. КФМЭИ-ТУ. 1998. С.26.
3. Анашкина И.А., Иванов А.В. Аспекты технического и экономического совершенствования автономных ветроагрегатов //Тезисы докладов III Республиканской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Казань. 1997. С.29.
4. Кропачев Г.Ф., Иванов А.В. Ветроэнергетический агрегат для автономного объекта //Сборник тезисов докладов и сообщений XV научно-технической конференции "Вопросы совершенствования боевого применения и разработок артиллерийского вооружения и военной техники". Казань. КВАКИУ им. маршала артиллерии М.Н.Чистякова. 1997. С.90.
5. Иванов А.В. Использование индукционного нагревателя при его питании от автономного источника //Тезисы докладов III Республиканской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Казань. 1997. С.29.
6. Кропачев Г.Ф., Иванов А.В. Новые функциональные возможности индукторного генератора //Сборник тезисов докладов и сообщений XVI военно-технической конференции "Вопросы совершенствования боевого применения и разработок артиллерийского вооружения и военной техники". Казань. КФ ВАУ. 1999. С.125.
7. Зиннер Л.Я., Кропачев Г.Ф., Иванов В.А. Костин А.Н. Модель автономной ветроэнергетической установки с индукционным нагревателем //Известия ВУЗов "Проблемы энергетики". 1999. №9-10. С.11-18.

8. Иванов А.В., Костин А.Н., Кузнецов Д.Н., Кореев М.С. Особенности работы автономной ветроэнергетической установки с нагрузкой типа индукционного нагревателя //Аннотация сообщений научной сессии КГТУ. Казань. 2000. С.111.
9. Иванов А.В., Кузнецов Д.Н., Кореев М.С., Костин А.Н. К вопросу учета влияния колебаний скорости ветра на параметры электрического генератора автономной ветроэнергетической установки //Аннотация сообщений научной сессии КГТУ. Казань. 2000. С.111.
- 10.Иванов А.В., Кореев М.С., Костин А.Н., Кузнецов Д.Н. К вопросу определения коэффициента пульсаций частоты вращения вала ветродвигателя //Аннотация сообщений научной сессии КГТУ. Казань. 2000. С.111.



2-00

Заказ 127

Тираж 90 экз.

Офсетная лаборатория КГТУ
420015 Казань, К. Маркса, 68